

В. Б. Мелехин, д-р техн. наук, проф., pashka1602@rambler.ru,
Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала,
М. В. Хачумов, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., khmike@inbox.ru,
Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, с. Вельское, Ярославская обл.,
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН,
Российский университет дружбы народов, г. Москва

Когнитивные инструменты абстрактного мышления автономных интеллектуальных мобильных систем*

Решаются актуальные проблемы искусственного интеллекта, связанные с разработкой инструментальных средств абстрактного мышления автономных интеллектуальных мобильных систем, позволяющих планировать целенаправленное поведение в труднодоступных и агрессивных для человека средах. Предложены когнитивные инструменты, обеспечивающие интеллектуальным системам возможность организации целенаправленной многоэтапной деятельности, связанной с решением сложных задач, когда план поведения автоматически строится в одних условиях проблемной среды, а заданная цель поведения достигается в других условиях функционирования, находящихся за пределами разрешающей способности технического зрения. Важной особенностью предложенных типовых элементов представления и обработки знаний является то, что они позволяют интеллектуальным системам организовать вывод решения сложных задач, опираясь только на данные, хранящиеся в модели представления знаний и поступающие из текущих условий функционирования.

В общем случае разработанная модель знаний интеллектуальных систем различного назначения состоит из декларативных и процедурных типовых элементов их представления. Для формального описания типовых элементов представления декларативных знаний используются традиционные семантические сети и различные наборы ограничений, отражающих дополнительные условия предстоящего функционирования автономных мобильных интеллектуальных систем. Что же касается формального описания типовых элементов представления процедурных знаний безотносительно к конкретной предметной области, то для этого используются нечеткие семантические сети. Это позволяет автономным интеллектуальным мобильным системам адаптироваться к конкретным условиям функционирования в недоопределенных проблемных средах и выполнять на этой основе сформулированные для них сложные задания.

Практическая значимость полученных результатов заключается в эффективности их использования для разработки интеллектуальных решателей задач, обеспечивающих автономным интеллектуальным мобильным системам различного назначения возможность выполнения сложных заданий в априори недоопределенных проблемных средах путем адаптации сформированного в общем виде плана целенаправленной деятельности к конкретным текущим условиям функционирования.

Ключевые слова: автономная интеллектуальная система, абстрактное мышление, типовые элементы представления знаний, инструментальные средства вывода решений, планирование многоэтапной деятельности

Введение

Потребность в решении различных по сложности практических задач в нестабильных, априори неописанных труднодоступных и агрессивных для человека проблемных средах (ПС) диктует объективную необходимость создания автономных интеллектуальных мобильных систем (АИМС) различного назна-

чения, обладающих по аналогии с человеком [1, 2] следующими формами мышления [3]:

1) наглядно-действенным мышлением, обеспечивающим способность АИМС к самообучению в априори неописанных ПС и формирование на этой основе условных программ целесообразной деятельности [4, 5]. В основу организации данной формы мышления АИМС закладываются метод проб и ошибок, механизмы избирательности поступающей из ПС информации, опирающиеся на анализ происходящих в ней изменений, а также инструмен-

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056>

ты безусловной рефлекторной деятельности живых организмов;

2) наглядно-образным мышлением, позволяющим АИМС выполнять сформулированное задание в различных недоопределенных условиях ПС, ограниченных рамками воспринимаемой в среде текущей ситуации [6–8]. В этом случае для вывода решений АИМС сравнивает между собой текущую и целевую ситуации ПС и на основе выявленных между ними различий генерирует план целенаправленной деятельности. Обработка действий сформированного таким образом плана поведения позволяет АИМС устранить все различия между текущей и целевой ситуациями ПС и достичь на этой основе цели поведения;

3) абстрактным мышлением, обеспечивающим АИМС возможность решения сложных задач в распределенных в пространстве ПС. Иначе говоря, этот тип мышления применяется в условиях, когда план целенаправленной деятельности строится в одной ситуации ПС, а для достижения заданной цели интеллектуальной системе требуется перейти, используя ряд промежуточных этапов поведения, в другую ситуацию ПС. Таким образом, данный вид мышления служит для организации полифазной или многоэтапной деятельности [9], когда полученное АИМС задание состоит из нескольких подцелей поведения, достижение каждой из которых, начиная с первой, выполняется в различных условиях ПС и является предпосылкой для перехода на следующий этап целенаправленной деятельности, реализуемый в новых условиях ПС.

Следует отметить, что в настоящее время наименее исследованными являются проблемы, связанные с построением эффективных инструментальных средств абстрактного мышления АИМС. В связи с этим для создания АИМС, обладающих высокими функциональными возможностями, требуется особое внимание уделить разработке когнитивных инструментов организации данной формы мышления.

В общем случае когнитивные инструменты абстрактного вывода решений должны наделять АИМС способностью планирования на альтернативной основе многоэтапной деятельности в недоопределенных условиях ПС, опираясь только на обработку данных, хранящихся в модели представления знаний, а также способностью адаптации и корректировки сформированного в общем виде плана поведения на

основе информации, поступающей из текущих условий функционирования. При этом следует также учитывать имеющиеся у интеллектуальной системы функциональные возможности и заданные ограничения, например, по времени решения поставленной задачи.

Таким образом, для создания АИМС, обладающих высокими интеллектуальными способностями, требуется разработка абстрактной модели представления знаний, а также инструментальных средств их обработки и вывода решений, в совокупности позволяющих интеллектуальным системам различного базирования и назначения планировать целенаправленную многоэтапную деятельность, связанную с решением сложных задач в изменяющихся условиях ПС. Одному из подходов решения данной проблемы и посвящается настоящее исследование.

Постановка задачи

Рассмотрим АИМС, оснащенную техническим зрением, манипулятором и моторной подсистемой. Пусть модуль технического зрения позволяет АИМС распознавать находящиеся в ПС объекты [10, 11] и строить модель текущих условий функционирования в виде традиционной семантической сети [12, 13]. Моторная подсистема и манипулятор обеспечивают АИМС возможность обработки различных элементарных действий $B = \{b_{i_1}\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$ позволяющих:

— целенаправленно перемещаться в ПС для перехода из одних условий функционирования в другие условия в процессе многоэтапной деятельности;

— манипулировать находящимися в среде объектами в целях преобразования текущей ситуации ПС в требуемую целевую ситуацию, соответствующую выполняемому этапу целенаправленной деятельности.

ПС целесообразно охарактеризовать элементами следующих множеств:

— допустимых ситуаций $s_{j_1} \in S$, определяющих различные этапы и условия целенаправленной деятельности АИМС, формальное описание которых строится в модуле технического зрения в виде семантических сетей $S_{j_1} \in S^*$, $S^* = \{S_{j_1}\}$, $j_1 = \overline{1, m_1}$;

— находящихся в среде объектов $O = \{o_{j_2}(X_{j_2})\}$, $j_2 = \overline{1, m_2}$, и видом семантических отношений

между ними $R = \{r_\gamma\}, \gamma = \overline{1, \eta}$, где X_{j_2} — множество признаков, однозначно характеризующих объект $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ ПС;

— событий $Q_1 = \{q_{j_3}(S_{j_1}^{j_3})\}, j_3 = \overline{1, m_3}$, и $Q_2 = \{q_{j_4}(S_{j_1}^{j_4})\}, j_4 = \overline{1, m_4}$, возникающих в ПС независимо от деятельности АИМС, где $S_{j_1}^{j_3}, S_{j_1}^{j_4}$ — подситуации, которые характеризуют изменения, происходящие в ПС в результате возникновения в ней, соответственно, событий $q_{j_3}(S_{j_1}^{j_3}) \in Q_1$ и $q_{j_4}(S_{j_1}^{j_4}) \in Q_2$.

Следует отметить, что к событиям $q_{j_3}(S_{j_1}^{j_3}) \in Q_1$ относятся такие явления, которые происходят только в определенных ситуациях ПС $s_{j_1} \in S$ и вносят в них изменения, способствующие достижению АИМС подцели поведения определенного текущего этапа полифазной деятельности. Примером может быть появление в ситуации $s_{j_1} \in S$ транспортного средства, которое может оперативно доставить АИМС в заданный пункт назначения. Как правило, подситуации $S_{j_1}^{j_3}$ характеризующие изменения, происходящие в текущей ситуации ПС $s_{j_1} \in S$, вызывают у АИМС определенные реакции, представляющие собой упорядоченный набор элементарных действий $b_i \in B$, отработка которых и обеспечивает интеллектуальной системе непосредственное достижение подцели на текущем этапе целенаправленной деятельности. Следовательно, решение одной из основных подзадач многоэтапной деятельности сводится к переходу АИМС из текущих условий функционирования в новые условия ПС, в которых происходят события $q_{j_3}(S_{j_1}^{j_3}) \in Q_1$, связанные с достижением интеллектуальной системой стоящей перед ней текущей подцели целенаправленной деятельности.

В свою очередь, события второго вида $q_{j_4}(S_{j_1}^{j_4}) \in Q_2$ в результате возникновения в ПС вносят в текущую ситуацию $s_{j_1} \in S$ ПС изменения, определяемые подситуацией $S_{j_1}^{j_4}$, которые сопровождаются возникновением в ПС соответствующей им угрозы результативной деятельности АИМС. Другими словами, в этом случае АИМС для достижения стоящей подцели поведения требуется предварительно либо устранить изменения, определяемые подситуацией $S_{j_1}^{j_4}$, которые были внесены событием $q_{j_4}(S_{j_1}^{j_4}) \in Q_2$ в текущее состояние ПС, либо предпринять меры, связанные со снижением влияния данных изменений ПС на дальнейшую результативную деятельность интеллектуальной системы.

Задание, определяющее целенаправленную деятельность, формулируется АИМС в процедурной форме представления в виде кортежа сложных действий $\langle B_1, B_2, \dots, B_{i_2}, \dots, B_{k_1} \rangle$, $B^* = \{B_{i_2}\}, i_2 = \overline{1, n_2}$, [14] с необходимыми для его эффективной реализации ограничениями, например, по времени решения поставленной задачи и т. п. Каждое такое сложное действие $B_{i_2} \in B^*$ фактически определяет одну из подзадач полифазной деятельности АИМС и представляет собой упорядоченную последовательность $\langle b_{i_1}^1(i_2), b_{i_1}^2(i_2), \dots, b_{i_1}^{k_2}(i_2) \rangle$ элементарных действий $b_{i_1} \in B$, а также условий их результативной отработки. Например, сформулированное АИМС задание может иметь следующее содержание:

"Найти на заданном участке проблемной среды все объекты $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, обладающие одним из наборов признаков X_1, X_2 или X_3 и перевезти их в заданное место проблемной среды".

Следовательно, на первом этапе предстоящей деятельности АИМС требуется отыскать в априори неописанной ПС и загрузить в свою тележку все объекты $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, удовлетворяющие одному из следующих условий: $X_1 \subseteq X_{j_2}$, $X_2 \subseteq X_{j_2}$ или $X_3 \subseteq X_{j_2}$. Затем на втором этапе поведения перевезти и разгрузить данные объекты в определенном месте ПС.

Таким образом, требуется разработать такие типовые элементы модели представления и обработки знаний, безотносительно к конкретной предметной области, опираясь на которые АИМС, в соответствии с функциональным назначением, становится способной автоматически планировать многоэтапную целенаправленную деятельность в различных нестабильных условиях ПС.

Структура и содержание типовых элементов представления знаний АИМС

В общем случае для решения АИМС многоэтапных задач на основе инструментальных средств абстрактного мышления в различных условиях ПС требуется, чтобы модель знаний интеллектуальной системы включала следующие виды типовых элементов их представления:

1. Традиционные семантические сети $S_{j_1} \in S^*$, описывающие текущие ситуации ПС $s_{j_1} \in S$.
2. Нечеткие семантические сети $S_{j_5} \in S^{**}$, $j_5 = \overline{1, m_5}$, [15], позволяющие безотносительно к конкретной предметной области описать

различные условия, которые должны выполняться в ПС для результативной деятельности АИМС в различных условиях функционирования. Данные семантические сети используются для построения типовых элементов представления знаний безотносительно к конкретной предметной области и применяются АИМС для выбора результативных действий в процессе планирования целенаправленной деятельности.

3. Типовые элементы, характеризующие условия, которые должны выполняться в ПС для результативной обработки АИМС различных действий:

- определяющие элементарные действия $b_{i_1} \in B$, которые позволяют АИМС регулировать значения отдельных отношений $r_\gamma \in R$ между объектами и событиями ПС;

- характеризующие альтернативные варианты решения $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$, $j_6 = \overline{1, m_6}$, типовых подзадач $d_{i_2} \in D$, соответствующих сложным действиям $B_{i_2} \in B^*$, из которых складывается многоэтапная деятельность АИМС.

4. Устанавливающие действия АИМС, обеспечивающие определенные изменения значений отношений $r_\gamma \in R$ между объектами ПС, требующиеся для достижения текущей подцели поведения.

5. Имеющие формат описания в виде логико-трансформационных правил вывода $q_{j_3}(S_{j_3}) : S_{j_3}^{i_2}(1) \& B_{i_2} \rightarrow S_{j_3}^{i_2}(2)$, обеспечивающих выбор на ситуационной основе [16] результативных сложных действий $B_{i_2} \in B^*$ после возникновения в ПС определенных событий $q_{j_3}(S_{j_3}) \in Q_1$, где $S_{j_3}^{i_2}(1) \& B_{i_2} \rightarrow S_{j_3}^{i_2}(2)$ — акт поведения, означающий, что если в текущей ситуации ПС $s_{j_1} \in S$ выполняются условия, определяемые подситуацией $S_{j_3}^{i_2}(1)$, то обработка АИМС сложного действия B_{i_2} приводит в среде к изменениям, которые описываются подситуацией $S_{j_3}^{i_2}(2)$.

Данные правила используются в процессе вывода решений, когда АИМС для достижения текущей подцели требуется получить результат $S_{j_3}^{i_2}(2)$ после возникновения в среде соответствующего события $q_{j_3}(S_{j_3})$. Примером может быть случай, когда АИМС необходимо сесть в ожидаемое транспортное средство после его появления в определенных условиях ПС для достижения текущей подцели поведения и т. п.

6. Определяющие наборы ограничений $h_{i_3}^{i_2} \in H$, $i_3 = \overline{1, n_3}$, на основании которых АИМС выбирает соответствующее им альтернативное

решение $d_{j_6}^{i_2}(i_3) \in D^*$ стоящей перед ней подзадачи $d_{i_2} \in D$ на текущем этапе целенаправленной деятельности. Примером таких ограничений могут быть вид и состояние грунта поверхности участка ПС, при которых АИМС может перемещаться по этому участку только с ограниченной скоростью и т. п.

7. Подситуации $S_{j_4}^*$, характеризующие условия возникновения в ПС событий $q_{j_4}(S_{j_4}^*) \in Q_2$.

8. Структурированное описание алгоритмов, используемых АИМС для решения различных непредвиденных подзадач в процессе планирования основной деятельности, относящихся к когнитивным инструментам наглядно-действенного и наглядно-образного мышления [2]. Например, к элементам данного вида модели представления знаний АИМС следует отнести алгоритм самообучения, позволяющий интеллектуальной системе организовать поисковую деятельность в априори неопределенных условиях ПС, и т. п.

Формально традиционные семантические сети $S_{j_1} \in S^*$ в модели представления знаний определяются помеченным графом $G_{j_1} = (V_{j_1}, E_{j_1})$, в котором вершины $v_{j_7} \in V_{j_1}$, $j_7 = \overline{1, m_7}$, помечаются находящимися в ПС объектами $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$, а ребра $e_{j_8} \in E_{j_1}$, $j_8 = \overline{1, m_8}$, — количественными оценками отношений, выполняющихся между данными объектами в текущих условиях функционирования АИМС.

В свою очередь, нечеткие семантические сети $S_{j_5} \in S^{**}$ модели представления знаний АИМС определяются помеченными нечеткими графами $G_{j_5} = (V_{j_5}, E_{j_5})$, где $V_{j_5} = \{v_{j_9}\}$, $j_9 = \overline{1, m_9}$, $E_{j_5} = \{e_{j_{10}}\}$, $j_{10} = \overline{1, m_{10}}$, — соответственно множества вершин и ребер. Пометки вершин $v_{j_9} \in V_{j_5}$ в нечетких семантических сетях S_{j_5} определяются соответствующими им слотами $x_{j_9}(X_{j_9})$, характеризующимися множеством признаков X_{j_9} , которыми должны обладать различные объекты ПС $o_{j_2}(X_{j_2}) \in O$ для того, чтобы была допустимой пометка этих слотов данными объектами в текущих условиях функционирования АИМС. Другими словами, пометка слота $x_{j_9}(X_{j_9})$ в сети S_{j_5} опускается находящимся в ПС объектом $o_{j_2}(X_{j_2})$, если выполняется условие $X_{j_9} \subseteq X_{j_2}$.

Ребра $e_{j_{10}} \in E_{j_5}$ в сети S_{j_5} определяются тройками $\langle T_{j_{11}}, y_{j_{11}}, y_{j_{11}+1} \rangle$, $j_{11} = \overline{1, 5}$, где $T_{j_{11}}$ — терм или словесное значение лингвистической переменной [17, 18], одноименной с на-

званием отношения, которым должно быть помечено ребро $e_{j_{10}}$. Таким образом, терм $T_{j_{11}}$ определяет, например, отношение "Допустимое расстояние между АИМС и объектом ПС" в следующем обобщенном виде: "Объект $o_{j_2}(X_{j_2})$ должен располагаться в ПС на "близком" расстоянии от местоположения АИМС"; $y_{j_{11}}, y_{j_{11}+1}$ — соответственно нижняя и верхняя граничные оценки подынтервала численных значений термина $T_{j_{11}}$ на количественной шкале соответствующей лингвистической переменной, характеризующего интервальное значение, которое определяет все допустимые расстояния между объектом ПС и АИМС, для того чтобы интеллектуальная система могла захватить этот объект.

Типовые элементы представления знаний АИМС, определяющие условия, необходимые для успешного выполнения интеллектуальной системой элементарных действий $b_{i_1} \in B$, имеют следующий формат описания: $\langle \text{Идентификатор действия } b_{i_1}, G_{i_1}^1, G_{i_1}^2 \rangle$, где $G_{i_1}^1$ — граф, определяющий нечеткую семантическую сеть, описывающую условия, которые должны выполняться в ПС для результативной отработки действия b_{i_1} в целях получения на этой основе изменений текущей ситуации ПС, определяемых нечеткой семантической сетью, представленной графом $G_{i_1}^2$.

Сведения, служащие АИМС для определения элементарных действий $b_{i_1} \in B$, позволяющих выполнить необходимое для достижения текущей подцели изменение текущего значения отношения $r_\gamma \in R$, имеют следующий формат описания:

$\langle \text{Идентификатор отношения } r_\gamma \in R; \text{ действие } b_{i_1}^+ \in B, \text{ позволяющее увеличить значение отношения } r_\gamma; \text{ действие } b_{i_1}^- \in B, \text{ обеспечивающее возможность уменьшить значение отношения } r_\gamma \rangle$.

В общем случае типовые элементы представления знаний, позволяющие АИМС выбирать на альтернативной основе наиболее эффективное согласно принятому критерию $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$ альтернативное решение типовой подзадачи $d_{i_2} \in D$ многоэтапной деятельности, имеют следующий формат описания:

$$d_{i_2} : \begin{cases} \text{если } h_{i_1}^{i_2}, \text{ то } d_{i_1}^{i_2}; \\ \text{если } h_{i_2}^{i_2}, \text{ то } d_{i_2}^{i_2}; \\ \dots \\ \text{если } h_{m_6}^{i_2}, \text{ то } d_{m_6}^{i_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где, например, имплекативное решающее правило "если $h_{i_2}^{i_2}$, то $d_{i_2}^{i_2}$ " означает, что в случае, когда у АИМС возникает необходимость в выполнении подзадачи $d_{i_2} \in D$ при наличии ограничений $h_{i_2}^{i_2}$, интеллектуальной системе следует использовать ее типовое решение $d_{i_2}^{i_2}$.

В свою очередь, каждое альтернативное решение $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$ типовой подзадачи $d_{i_2} \in D$ имеет следующий формат описания:

$$\langle \text{"вход}_{j_6}(i_2), \text{"тело}_{j_6}(i_2), \text{"выход}_{j_6}(i_2) \rangle,$$

где "вход $_{j_6}(i_2)$ " — нечеткая семантическая сеть $S_{j_5}^{j_6}(1) \in S^{**}$, определяющая условия, которые должны выполняться в ПС для успешной отработки АИМС сложного действия $B_{i_2}^{j_6} \in B^*$, образующего "тело $_{j_6}(i_2)$ " j_6 альтернативного варианта решения типовой подзадачи $d_{i_2} \in D$, которое соответствует ограничениям $h_{i_2}^{i_2}$; "выход $_{j_6}(i_2)$ " — нечеткая семантическая сеть $S_{j_5}^{j_6}(2)$, соответствующая условиям ПС, подтверждающим достижение АИМС подцели поведения, связанной с решением $d_{i_2} \in D$ типовой подзадачи.

Типовые элементы $q_{j_4}(S_{j_4}^{i_2}) : S_{j_4}^{i_2}(1) \& B_{i_2} \rightarrow S_{j_4}^{i_2}(2)$ представления знаний АИМС имеют следующее содержание:

"Если в текущей ситуации ПС $s_{j_1} \in S$ выполняются условия, определяющиеся нечеткой семантической сетью $S_{j_4}^{i_2}(1)$, а также произошло событие $q_{j_4}(S_{j_4}) \in Q_2$ и соответствующие этому событию изменения S_{j_4} , то выполнение АИМС сложного действия B_{i_2} позволяет решить текущую подзадачу многоэтапного поведения, связанную с изменениями текущих условий функционирования, определяемых нечеткой семантической сетью $S_{j_4}^{i_2}(2)$ ".

Элементы представления знаний $h_{i_3}^{i_2} \in H$, определяющие в соответствии с текущими условиями ПС различные подмножества $h_{i_3}^{i_2}$ ограничений функциональных возможностей АИМС, на основе которых интеллектуальная система осуществляет выбор решения соответствующих этим ограничениям типовых подзадач $d_{i_2} \in D$ на альтернативной основе, могут включать следующие их основные виды:

— ограничения, задаваемые совместно с формулируемым интеллектуальной системе заданием, например в виде времени, отведенного АИМС на решение отдельной подзадачи $d_{i_2} \in D$ или на выполнение всего полученного задания и т. п.;

— ограничения, определяемые исходя из имеющихся у АИМС текущих возможностей, например ограничения, связанные с максимально возможной скоростью перемещения по заданному участку местности, зависящей от вида и состояния грунта его поверхности, и т. п. (состояние поверхности грунта после дождя ограничивает скорость перемещения АИМС);

— ограничения, связанные с высокой вероятностью возникновения в текущих условиях ПС событий $q_{j_4}(S_{j_4}) \in Q_2$.

При необходимости в обобщенном виде количественные оценки различных ограничений определяются терминами одноименной с ними лингвистической переменной и подынтервалом его численных значений. Например, ограничения, связанные с рабочей зоной манипулятора АИМС, определяются вышеописанной тройкой $\langle T_{j_{11}}, y_{j_{11}}, y_{j_{11}+1} \rangle$, где $y_{j_{11}}, y_{j_{11}+1}$ — соответственно верхняя и нижняя оценки допустимых расстояний до объектов ПС, определяющих разрешающую способность манипулятора интеллектуальной системы.

Для описания седьмого вида типовых элементов представления знаний используются следующие импликативные решающие правила:

$$S_{j_4}^* \rightarrow P(q_{j_4}(S_{j_4})),$$

где $S_{j_4}^*$ — нечеткая семантическая сеть, определяющая условия ПС, в которых может возникнуть событие $q_{j_4}(S_{j_4})$ с вероятностью, равной $P(q_{j_4}(S_{j_4}))$.

Интеллектуальная система принимает решение о том, что в процессе планирования поведения необходимо учитывать возможность проявления в текущих условиях ПС события $q_{j_4}(S_{j_4})$, если вероятность $P(q_{j_4}(S_{j_4}))$ является высокой, т. е. превышает, например, заданный порог P^* , равный 0,5. В общем случае описание подsituаций $S_{j_4}^*$ и значения соответствующих им вероятностей $P(q_{j_4}(S_{j_4}))$ возникновения в ПС событий $q_{j_4}(S_{j_4}) \in Q_2$ могут определяться АИМС на основе накопленного опыта поведения в различных условиях функционирования или на основе экспертных данных.

Наконец, типовые элементы представления знаний восьмого вида представляют собой структурированное описание различных алгоритмов планирования поведения, относящихся к инструментальным средствам наглядно-действенного и наглядно-образного мышления АИМС [2]. Данные алгоритмы используются АИМС в процессе реализации построенного

плана многоэтапной деятельности при необходимости решения дополнительно возникающих в этом случае подзадач, например при появлении в ПС событий $q_{j_4}(S_{j_4}) \in Q_2$.

К одному из таких типовых элементов представления знаний относится, например, алгоритм самообучения, позволяющий АИМС организовать в реальном времени деятельность, связанную с поиском заданных объектов в априори неописанных условиях ПС. Данный алгоритм в модели знаний АИМС представляется в следующем формате описания:

<Идентификатор, определяющий назначение алгоритма самообучения, метод>,

где *метод* определяется структурированным описанием данного алгоритма в модели представления знаний, позволяющим АИМС его реализацию.

Следует отметить, что типовые элементы представления знаний восьмого вида обеспечивают АИМС возможность, в зависимости от возникающих в ПС непредвиденных обстоятельств, организовать в процессе вывода решений рациональное сочетание инструментальных средств различных видов мышления. Это позволяет АИМС построить результативную целенаправленную деятельность в различных по сложности целенаправленного преобразования условиях ПС.

Необходимо также отметить, что предложенные типовые элементы представления знаний фактически принадлежат к одной из следующих двух групп. В первую группу входят типовые элементы, относящиеся к декларативным моделям представления знаний, служащим для описания различных возможных допустимых условий функционирования АИМС. Вторую группу определяют элементы, относящиеся к процедурным знаниям, которые отражают в общем виде безотносительно к конкретной предметной области закономерности преобразования различных допустимых ситуаций ПС. В совокупности обе группы типовых элементов представления знаний обеспечивают АИМС возможность планирования целенаправленной деятельности в обобщенном виде, без привлечения данных, отражающих закономерности конкретной ПС. Построенный таким образом план предстоящей деятельности уточняется и корректируется в процессе реализации с учетом фактической ситуации ПС, что обеспечивает АИМС способность адаптироваться в процессе поведения

к различным априори недоопределенным условиям функционирования.

Когнитивные инструменты планирования и реализации многоэтапной деятельности АИМС

Из структуры разработанных элементов представления знаний АИМС следует, что к основным операциям, связанным с их обработкой в процессе вывода решений, относятся [15]:

— определение нечеткого вложения формального описания $G_{j_5} = (V_{j_5}, E_{j_5})$, например, подситуации $S_{j_4}^{i_2}(1)$ в формальное описание в виде графа $G_{j_1} = (V_{j_1}, E_{j_1})$ семантической сети $S_{j_1} \in S^*$, соответствующей текущей ситуации ПС $s_{j_1} \in S$;

— сравнение между собой семантических сетей $S_{j_1} \in S^*$ и $S_{j_4} \in S^{**}$ для установления их нечеткого равенства.

Определение 1. Нечеткая семантическая сеть $S_{j_4} \in S^{**}$, определяемая графом G_{j_4} , является нечетко вложенной в семантическую сеть $S_{j_1} \in S^*$, которой биективно соответствует граф G_{j_1} , при выполнении следующих условий:

а) для каждой вершины $v_{j_9} \in V_{j_4}$ графа G_{j_4} , которая помечена слотом $x_{j_4}(X_{j_4})$, существует структурно эквивалентная ей вершина $v_{j_4} \in V_{j_1}$, помеченная в графе G_{j_1} объектом $o_{j_2}(X_2)$, для которого выполняется условие $X_{j_4} \subseteq X_{j_2}$;

б) для каждого ребра $e_{j_9} \in V_{j_4}$ графа G_{j_4} , помеченного тройкой $\langle T_{j_{11}}, y_{j_{11}}, y_{y_{j_{11}+1}} \rangle$, существует структурно эквивалентное ему ребро $e_{j_5} \in E_{j_1}$, помеченное в графе G_{j_1} количественной оценкой r_γ^* отношения $r_\gamma \in R$, одноименного с лингвистической переменной, определяющей терм $T_{j_{11}}^{j_{10}}$, для которой выполняется условие $r_\gamma^* \in (y_{j_{11}}, y_{y_{j_{11}+1}})$.

Определение 2. Сравнимые семантические сети $S_{j_1} \in S^*$ и $S_{j_4} \in S^{**}$ нечетко равны между собой, если соответствующие им помеченные графы G_{j_1} и G_{j_4} являются изоморфными с точностью до нечеткого равенства пометок структурно эквивалентных в них вершин и ребер.

Следует отметить, что сложность выполнения рассмотренных выше операций сравнения между собой семантических сетей $S_{j_1} \in S^*$ и $S_{j_4} \in S^{**}$ имеет порядок $O(m_9^2)$, где m_9^2 — число вершин в графе G_{j_1} . Это обусловлено тем, что в этом случае между собой сравниваются помеченные графы G_{j_1} и G_{j_4} . Данное обстоя-

тельство позволяет оперативным образом реализовать данные операции на бортовом компьютере АИМС.

В общем случае процесс планирования многоэтапной целенаправленной деятельности АИМС в различных условиях ПС складывается из следующих друг за другом основных шагов и соответствующих им когнитивных инструментов обработки знаний в процессе вывода решений.

1. Начало. Разбить полученное задание на типовые подзадачи, каждая из которых включает соответствующее ей сложное действие $B_{i_2} \in B^*$.

2. Определить по элементам представления знаний пятого вида, требуется или нет для результативной отработки каждого выявленного сложного действия $B_{i_2} \in B^*$ появления в ПС определенного события $q_{j_3}(S_{j_3}) \in Q_1$.

Если сложное действие $B_{i_2} \in B^*$ является результативным только после возникновения в ПС события $q_{j_3}(S_{j_3}) \in Q_1$, то определить условия успешной отработки этого сложного действия на основе следующего типового элемента представления знаний: $S_{j_3}^{i_2} \& B_{i_2} \rightarrow S_{j_3}^{i_2}(2)$.

3. Используя порядок расположения типовых задач в полученном задании, построить кортеж сложных действий $B_{i_2} \in B^*$, определяющий в общем виде план предстоящей деятельности с учетом установленных условий ПС, необходимых для их результативной отработки. Например, обобщенный план предстоящей деятельности может иметь следующую структуру:

$$\langle \langle S_{j_3}^1(1) \& B_1 \rightarrow S_{j_3}^1(2) \rangle, \langle S_{j_3}^2(1) \& B_2 \rightarrow S_{j_3}^2(2) \rangle, \dots, \dots, \langle S_{j_3}^\varphi(1) \& B_\varphi \rightarrow S_{j_3}^\varphi(2) \rangle \rangle,$$

где $S_{j_3}^1(1), S_{j_3}^\varphi(2)$ — нечеткие семантические сети, характеризующие условия, которые, соответственно, должны выполняться в исходной и целевой ситуациях ПС; φ — число подзадач, которое требуется решить АИМС согласно сформулированному ей заданию.

4. Принять значение δ счетчика, определяющего номер текущего этапа реализации сформированного плана целенаправленной деятельности (2), равным единице.

5. Сформировать формальное описание $S_{j_1}(\delta) \in S^*$ ситуации $s_{j_1}(\delta) \in S$, соответствующей текущим условиям функционирования АИМС.

6. Проверить условие "нечеткая семантическая $S_{j_3}^\delta$ является нечетко вложенной в семан-

тическую сеть $s_{j_1}(\delta) \in S$ "; если условие выполняется, то перейти на шаг планирования п. 7; в противном случае, перейти на шаг планирования п. 10.

7. Сформировать набор ограничений $h_{i_3}^{i_2}(\delta) \in H$, определяющих дополнительные условия решения подзадачи $d_{i_2} \in D$, соответствующей сложному действию B_δ , обрабатываемому АИМС на текущем этапе целенаправленной деятельности. В общем случае данный набор ограничений может включать следующие их основные виды:

7.1. Ограничения общего характера, задаваемые совместно со сформулированным интеллектуальной системе заданием и учитываемые в процессе решения всех соответствующих этому заданию подзадач.

7.2. Ограничения, связанные с текущими условиями ПС, например, с условиями, препятствующими максимальной скорости движения АИМС на заданном участке местности. Каждое ограничение данного вида АИМС учитывает в процессе планирования поведения в том случае, когда в структуру сложного действия B_δ входит элементарное действие $b_{i_1} \in B$, эффективной обработке которого оно препятствует.

7.3. Ограничения, учитываемые при высокой вероятности возникновения событий $q_{j_4}(S_{j_4}^*) \in Q_2$ в текущих условиях ПС на текущем этапе целенаправленной деятельности АИМС. Для определения необходимости учета АИМС данного вида ограничений используются типовые элементы представления знаний седьмого вида. Данные элементы представления знаний позволяют АИМС выполнить проверку, например, следующего условия: "является или нет нечеткая семантическая сеть $S_{j_4}^*$ нечетко вложенной в семантическую сеть $S_{j_1}(\delta)$, определяющую текущие условия функционирования АИМС". Если данное условие выполняется, то в набор ограничений $h_{i_3}^{i_2}(\delta)$ добавляется соответствующее ему событие $q_{j_4}(S_{j_4}^*) \in Q_2$.

Учет ограничений такого вида позволяет АИМС в случае возникновения в текущих условиях функционирования событий $q_{j_4}(S_{j_4}^*) \in Q_2$ оперативно на них реагировать и построить, используя типовые элементы представления знаний третьего и четвертого вида, подплан поведения, обработка которого позволяет устранить произошедшие в среде изменения, определяемые нечеткой семантической сетью $S_{j_4}^*$.

8. Определить наиболее эффективный альтернативный вариант $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$ решения подзадачи $d_{i_2} \in D$ согласно следующему правилу его выбора:

а) для всех альтернативных вариантов $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$ решения подзадачи $d_{i_2} \in D$, используя решающее правило (1), определить мощности множеств $h^* \left| h_{i_3}^{i_2}(\delta) \cap h_{j_6}^{i_2} \right|$, $j_6 = \overline{1, m_6}$;

б) выбрать такой вариант $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$ решения подзадачи $d_{i_2} \in D$, для которого мощность множества h^* является максимальной.

9. Выбрать в модели представления знаний структурированное описание $\langle \text{"вход}_{j_6}(i_2) \rangle$, "тело $_{j_6}(i_2)$ ", "выход $_{j_6}(i_2)$ " \rangle , найденного типового варианта $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$ решения подзадачи $d_{i_2} \in D$. Отработать подплан текущего этапа целенаправленной деятельности, выполнив элементарные действия $b_{i_1} \in B$, образующие "тело $_{j_6}(i_2)$ " подзадачи $d_{j_6}^{i_2} \in D^*$. После достижения текущей подцели поведения принять $\delta = \delta + 1$, перейти на шаг планирования поведения п. 5.

10. Построить, используя типовые элементы модели представления знаний третьего и четвертого вида, подплан целенаправленного поведения, обработка которого позволяет обеспечить выполнение в ПС условий, определяемых нечеткой семантической сетью $S_{j_3}^\delta(1)$.

11. Проверить условие " $\delta = \varphi$ ": если условие выполняется, то перейти к п. 12; в противном случае перейти на шаг планирования поведения п. 7.

12. Сформированный план поведения отработан; конец.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что предложенные процедуры планирования целенаправленной деятельности АИМС могут быть отнесены к инструментальным средствам абстрактного мышления ввиду того, что они, опираясь только на данные, хранящиеся в модели представления знаний и поступающие из текущих условий функционирования, позволяют интеллектуальным системам выполнять сложные задания в различных по содержанию закономерностей ПС.

Заключение

В статье разработана оригинальная модель представления и обработки знаний абстрактного мышления, позволяющая АИМС планировать многоэтапную целенаправленную де-

тельность в распределенных в пространстве ПС. Предложенная модель состоит из типовых элементов ("кирпичиков"), отражающих известные АИМС общие сведения о предполагаемых закономерностях преобразования различных допустимых условий функционирования. Это позволяет интеллектуальным системам адаптироваться к фактическим текущим условиям функционирования и на этой основе выполнять сложные задания в недоопределенных ПС.

Практическая значимость полученных результатов исследования заключается в эффективности их использования для разработки интеллектуальных решателей задач, обеспечивающих автономным интеллектуальным мобильным системам различного назначения выполнение сложных заданий в труднодоступных и агрессивных для человека средах.

Список литературы

1. Курпатов А. В. Мышление. Системное исследование. М.: Капитал, 2022. 672 с.
2. Губайновский В. А. Искусственный интеллект и мозг человека. М.: Наука, 2019. 254 с.
3. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование поведения автономных интеллектуальных мобильных систем в условиях неопределенности / Под ред. проф. В. М. Хачумова. СПб: Политехника, 2022. 276 с.
4. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Инструментальные средства управления целесообразным поведением самоорганизующихся автономных интеллектуальных агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22, № 4. С. 171–80.
5. Карпов В. Э., Карпова И. П., Кулинич А. А. Социальные сообщества роботов. М.: ЛЕНАНД, 2019. 352 с.

6. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Принцип построения процедур планирования поведения автономных интеллектуальных роботов на основе полипеременных условно-зависимых предикатов // Автоматика и телемеханика. 2022. № 4. С. 140–154.
7. Газе-Рапопорт М. Г., Поспелов Д. А. От амёбы к роботу. Модели поведения. М.: URSS, 2019. 304 с.
8. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 808 p.
9. Melekhin V. B., Khachumov M. V. Planning polyphasic behavior of autonomous intelligent mobile systems in uncertain environments // Information and Control Systems. 2021. N. 4 (113). P. 28–36.
10. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Принцип распознавания объектов проблемной среды в процессе планирования поведения автономной интеллектуальной мобильной системы // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, № 3 (55). С. 181–187.
11. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing. London: Pearson, 2018. 1168 p.
12. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson, 2020. 1216 p.
13. Остроух А. В. Интеллектуальные системы. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 316 с.
14. Мелехин В. Б., Хачумов В. М. Элементы понятийного мышления в планировании поведения автономных интеллектуальных агентов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2021. Т. 22, № 8. С. 411–419.
15. Melekhin V. B., Khachumov M. V. Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems // Scientific and Technical Information Processing. 2021. Vol. 48, N. 5. P. 333–341.
16. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Ситуационный подход в задачах автоматизированного управления техническими объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 9. С. 562–578.
17. Zaden L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part I: Information Sciences. 1975. Vol. 8. P. 199–249; Part II: Information Sciences. 1975. Vol. 8, P. 301–357; Part III: Information Sciences. 1975. Vol. 9. P. 43–80.
18. Флегонтов А. В., Вилков В. Б., Черных А. К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. М.: Лань, 2020. 332 с.

Cognitive Tools for Abstract Thinking Autonomous Intelligent Mobile Systems

V. B. Melekhin, pashka1602@rambler.ru,

Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation,

M. V. Khachumov, khmike@inbox.ru,

Ailamazyan Program Systems Institute of Russian Academy of Sciences, Veskovo, 152021, Russian Federation,
Federal Research Center "Computer Science and Control", Moscow, 117313, Russian Federation,
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198, Russian Federation

Corresponding author: Melekhin Vladimir B., Dr. Sc. (Technology), Professor, Dagestan State Technical University, Makhachkala, 367015, Russian Federation, e-mail: pashka1602@rambler.ru

Accepted on December 22, 2022

Abstract

The actual problems of artificial intelligence related to the development of tools for abstract thinking of autonomous intelligent mobile systems are being solved, which allow planning purposeful behavior in hard-to-reach and aggressive environments for humans. Cognitive tools are proposed that provide intelligent systems with the ability to organize purposeful multi-stage activities related to solving complex problems, when a behavior plan is automatically built in some conditions of

a problematic environment, and a given behavior goal is achieved in other operating conditions that are beyond the resolution of technical vision. An important feature of the proposed typical elements of knowledge representation and processing is that they allow intelligent systems to organize the output of solving complex problems, relying only on the data stored in the knowledge representation model and coming from the current operating conditions. In the general case, the developed knowledge model of intelligent systems for various purposes consists of declarative and procedural typical elements of their representation. For a formal description of typical elements of declarative knowledge representation, traditional semantic networks and various sets of restrictions are used, reflecting additional conditions for the future functioning of autonomous mobile intelligent systems. As for the formal description of the typical elements of the representation of procedural knowledge, regardless of a specific subject area, fuzzy semantic networks are used for this. This allows autonomous intelligent mobile systems to adapt to specific operating conditions in underdetermined problematic environments and perform complex tasks formulated by them on this basis. The practical significance of the results obtained lies in the effectiveness of their use for the development of intelligent problem solvers that provide autonomous intelligent mobile systems for various purposes with the ability to perform complex tasks in a priori underdetermined problematic environments by adapting the purposeful activity plan formed in general form to specific current operating conditions.

Keywords: autonomous intelligent system, abstract thinking, typical elements of knowledge representation, decision inference tools, multi-stage activity planning

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056>

For citation:

Melekhin V. B., Khachumov M. V. Cognitive Tools for Abstract Thinking Autonomous Intelligent Mobile Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 6, pp. 317–326.

DOI: 10.17587/mau.24.317-326

References

1. **Kurpatov A. V.** Thinking. System research, Moscow, Kapital, 2022, 672 p. (in Russian).
2. **Gubajnovskij V. A.** Artificial intelligence and the human brain, Moscow, Nauka, 2019, 254 p. (in Russian).
3. **Melekhin V. B., Hachumov M. V.** Planning the Behavior of Autonomous Intelligent Mobile Systems under Uncertainty, St. Petersburg, Politekhnik, 2022, 276 p. (in Russian).
4. **Melekhin V. B., Hachumov M. V.** Instrumental means of controlling the expedient behavior of self-organizing autonomous intelligent agents, *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 171–80 (in Russian).
5. **Karpov V. E., Karpova I. P., Kulnich A. A.** Social communities of robots, Moscow, LENAND, 2019, 352 p. (in Russian).
6. **Melekhin V. B., Khachumov M. V.** Principle of Constructing Procedures for Planning Behavior of Autonomous Intelligent Robots Based on Polyvariable Conditionally Dependent Predicates, *Automation and remote control*, 2022, vol. 83, no. 4, pp. 593–605.
7. **Gaze-Rapoport M. G., Pospelov D. A.** From amoeba to robot. Behavior models, Moscow, URSS, 2019, 304 p. (in Russian).
8. **Kelly A.** Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods, Cambridge, Cambridge University Press, 2013, 808 p.
9. **Melekhin V. B., Khachumov M. V.** Planning polyphasic behavior of autonomous intelligent mobile systems in uncertain environments, *Information and Control Systems*, 2021, no. 4 (113), pp. 28–36 (in Russian).
10. **Melekhin V. B., Khachumov M. V.** The principle of object recognition in a problematic environment in the process of planning the behavior of an autonomous intelligent mobile system, *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2022, no. 1–3 (55), pp. 181–187 (in Russian).
11. **Gonzalez R. C., Woods R. E.** Digital image processing, London, Pearson, 2018, 1168 p.
12. **Russell S., Norvig P.** Artificial Intelligence: A Modern Approach, Pearson, 2020, 1216 p.
13. **Ostrouh A. V.** Intelligent systems, Krasnoyarsk, Nauchno-innovacionnyj centr, 2020, 316 p. (in Russian).
14. **Melekhin V. B., Hachumov V. M.** Elements of conceptual thinking in planning the behavior of autonomous intelligent agents, *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, 2021, vol. 22, no 8, pp. 411–419 (in Russian).
15. **Melekhin V. B., Hachumov V. M.** Fuzzy semantic networks as an adaptive model of knowledge representation of autonomous intelligent systems, *Scientific and Technical Information Processing*, 2021, vol. 48, no 5, pp. 333–341.
16. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Situational approach in tasks of automated control of technical objects, *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 9, pp. 562–578 (in Russian).
17. **Zaden L. A.** The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part I: *Information Sciences*, 1975, vol. 8, pp. 199–249; Part II: *Information Sciences*, 1975, vol. 8, pp. 301–357; Part III: *Information Sciences*, 1975, vol. 9, pp. 43–80.
18. **Flegontov A. V., Vilkov V. B., CHernyh A. K.** Modeling of decision making problems with fuzzy initial data, Moscow, Lan', 2020, 332 p. (in Russian).